



Un modèle de calcul des hauteurs prévisibles de remontée de fontis à l'aplomb d'exploitations souterraines peu profondes

Christophe Didier, Romuald Salmon

► To cite this version:

Christophe Didier, Romuald Salmon. Un modèle de calcul des hauteurs prévisibles de remontée de fontis à l'aplomb d'exploitations souterraines peu profondes. *Revue française de Géotechnique*, 2010, 133, pp.21-36. ineris-00961756

HAL Id: ineris-00961756

<https://hal-ineris.archives-ouvertes.fr/ineris-00961756>

Submitted on 20 Mar 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Un modèle de calcul des hauteurs prévisibles de remontée de fontis à l'aplomb d'exploitations souterraines peu profondes.

A model for calculating the height of collapse chimney above shallow underground mines.

C. DIDIER *

R. SALMON *

* INERIS, Ground & Underground Risk Division, Parc Technologique Alata, BP n°2, 60550 Verneuil-en-Halatte, France;

Correspondence to C. DIDIER. tel: +33-3-44-55-68-36; fax: +33-3-44-55-67-00; Christophe.Didier@ineris.fr.

Résumé

Le « fontis » est un mouvement de terrain qui résulte de la remontée en surface d'un éboulement du toit d'une excavation souterraine. Lorsque la voûte initiée par la rupture du premier banc rocheux de l'excavation ne se stabilise pas mécaniquement du fait de la présence de bancs massifs au sein du recouvrement, elle se propage progressivement vers la surface. Si l'espace disponible au sein des vieux travaux est suffisant pour que les matériaux éboulés foisonnés puissent s'y accumuler sans bloquer le phénomène par « auto-comblement », la voûte peut atteindre la surface du sol. Pour optimiser le diagnostic de survenue possible de fontis à l'aplomb d'une zone sous-minée, l'INERIS a développé une modélisation analytique du phénomène d'auto-comblement basée sur une approche volumétrique en trois dimensions du développement du cône d'éboulis. En fonction des caractéristiques de l'exploitation souterraine et des propriétés mécaniques des terrains de recouvrement, il est ainsi possible de définir la hauteur théorique de remontée de fontis à partir de laquelle le phénomène se bloque par auto-comblement. En comparant cette hauteur théorique avec l'épaisseur des terrains de recouvrement, il est possible de définir si le site concerné est, ou non, sensible au développement de fontis en surface.

Abstract

Sinkholes are surface instabilities resulting from the collapse of the overlying rock as a consequence of roof failure above an underground excavation. When the roof failure progress is not stopped mechanically because of the presence of massive beds in the overburden, it spreads gradually to the surface. If space within the old workings is sufficient for the collapsed materials to accumulate without blocking the phenomenon by self-choking, the upward collapse process can reach the surface. To optimise the diagnosis of possible occurrence of subsidence above shallow underground mines, INERIS has developed an analytical modeling of the phenomenon based on a three-dimensional volumetric evaluation of the collapsed material. Depending on the characteristics of the underground workings and mechanical properties of overburden, it is possible to define the theoretical height of chimney collapse from which the phenomenon is blocked by self-choking. By comparing the theoretical height with the thickness of overburden, it is possible to determine if this site is, or is not, subject to the development of sinkhole.

1 Introduction

Le sous-sol du territoire français, comme celui de nombreux autres pays, a fait l'objet d'une intense exploitation des ressources minérales présentes. De très nombreuses cavités souterraines, pour la plupart abandonnées depuis très longtemps et pour certaines même

totalement oubliées par la population, sont ainsi réparties sur l'ensemble du territoire. Ces vides souterrains, notamment lorsqu'ils se trouvent à des profondeurs peu importantes (de l'ordre de quelques dizaines de mètres) peuvent donner naissance à des instabilités susceptibles de porter atteinte à la sécurité des personnes et des biens (bâti, infrastructures, activités) présents dans l'emprise de ces anciens travaux.

Parmi les instabilités susceptibles de se développer à l'aplomb d'anciennes cavités, le phénomène dit de « fontis » est, dans certains cas, le plus fréquent. Il est à l'origine des dernières victimes que la France a eu à déplorer au cours de ces dernières années au droit de cavités souterraines abandonnées (Massif de l'Hautil en 1991, Haute-Normandie en 2001). Pour s'affranchir de tels risques, il est essentiel que les décideurs en charge de l'aménagement du territoire puissent s'appuyer sur des experts bénéficiant d'outils permettant de diagnostiquer de manière fiable le risque de développement d'instabilités en surface.

A cet égard, l'INERIS a développé un modèle analytique s'attachant à évaluer la propagation d'une cloche d'éboulement prenant naissance au sein d'une cavité souterraine et se développant au travers du recouvrement, en direction de la surface. Basé sur une approche volumétrique des quantités de matériaux éboulés, ce modèle permet de déterminer si le mécanisme d'auto-comblement, induit par le foisonnement des éboulis, permet de garantir une stabilisation du phénomène avant son arrivée en surface.

Après une rapide description du phénomène de fontis, l'article présente les principes du modèle analytique développé, en précisant notamment les hypothèses retenues en fonction des configurations des cavités. Une discussion est alors menée sur l'influence des principaux facteurs qui jouent un rôle fondamental sur le développement et la propagation du phénomène.

2 Le phénomène de fontis

2.1 Les principales étapes du développement d'un fontis

On appelle **fontis** un effondrement localisé de la surface du sol qui résulte de la remontée au jour d'un éboulement initié au sein d'une excavation souterraine, notamment au droit d'un carrefour de galeries ou d'une chambre d'exploitation (Obert & Duvall, 1967). Nous nous restreindrons, de fait, dans le cadre de cet article, aux instabilités initiées par une chute de toit, en excluant les ruptures résultant de la ruine de piliers.

L'apparition au jour d'un entonnoir de fontis résulte de la succession de plusieurs phases caractérisant l'évolution du phénomène dans le temps et dans l'espace (figure 1).

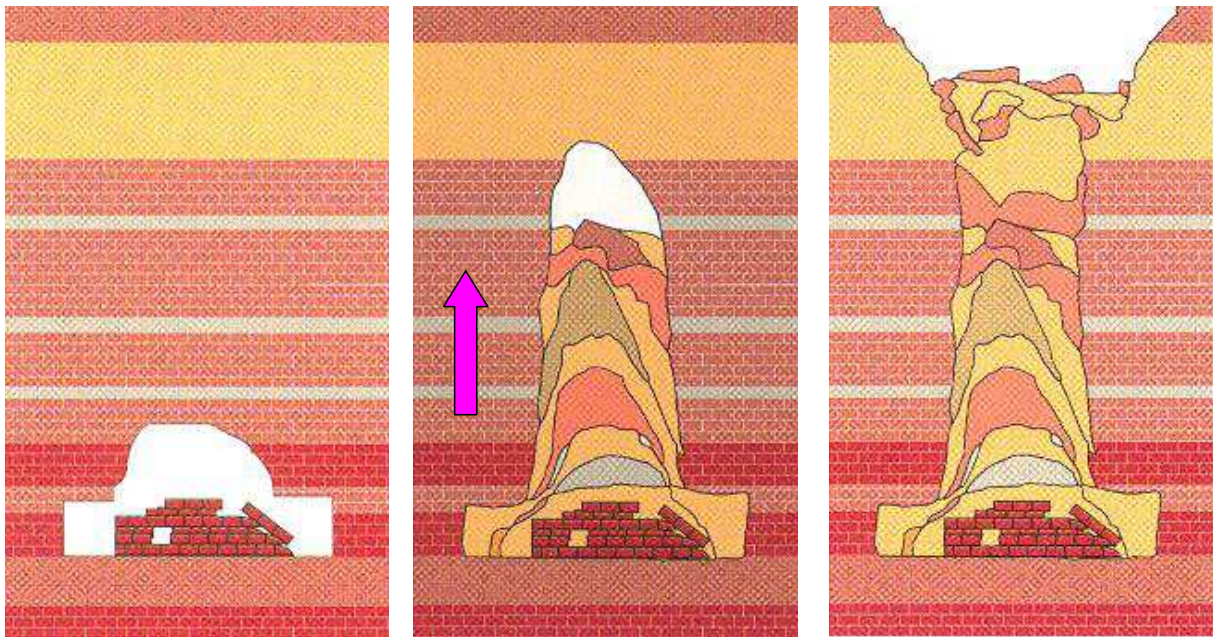


Figure 1 : Principales phases de l'évolution d'un fontis.

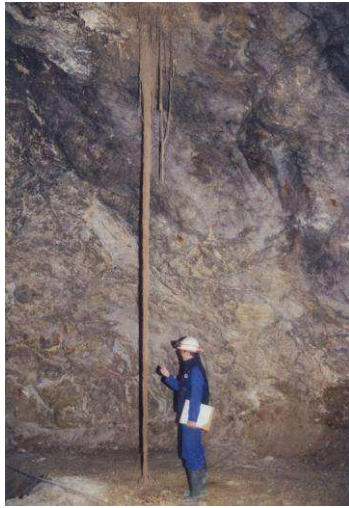
Figure 1 : Main stages of sinkhole evolution

1. La première étape correspond à la **chute du toit** de la galerie sous-jacente. Ce type d'instabilité peut affecter la plupart des exploitations souterraines. Il s'explique par un dépassement de la résistance des bancs du toit de la cavité au regard des efforts de flexion ou de cisaillement qui s'exercent en leur sein (Morgan, 1973 ; Karfakis, 1986) (figure 2). Ainsi, la présence d'une largeur de galerie importante, l'existence de bancs de toit de faible épaisseur et peu résistants ainsi qu'une fracturation naturelle du massif rocheux ou certains facteurs aggravants (venues d'eau, vibrations, effet de la végétation, couloirs karstiques) favoriseront l'initiation du phénomène (figures 3a et 3b). De fait, les chutes de toit s'initient souvent aux carrefours de galeries (plus grande portée de toit non soutenue,) ainsi qu'à proximité des entrées (forte densité de fracturation du massif).



Figure 2 : Exemple de chute de toit dans une carrière de calcaire grossier (Septmonts, Oise)

Figure 2 : An example of roof collapse in a limestone mine (Septmonts, Oise, France)



Figures 3a et 3b : Exemples de facteurs aggravants : impact d'un système racinaire (a) et intersection d'un couloir karstique (b).

Figures 3a and 3b : Examples of acceleration events : impact of a root system (a), intersection with a karstic cavity (b)

2. L'étape suivante est appelée **montée de voûte**. Elle correspond à la propagation, généralement lente, de l'instabilité au travers des terrains de recouvrement (figure 4) sous l'effet de conjugué de la pesanteur et des facteurs aggravants décrits plus haut. Suivant la nature des terrains traversés, la montée de voûte est susceptible de prendre des formes sensiblement différentes. Ainsi, au sein de terrains peu cohérents (sables, terrains déconsolidés), l'instabilité aura tendance à prendre une forme « évasée » dans le sens où son rayon a propension à s'élargir au fur et à mesure de la propagation de la cloche vers la surface. A l'inverse, dans des terrains plus résistants (calcaire, craie) l'instabilité prendra plutôt une forme de « voûte fermée » avec un rayon de cheminée diminuant progressivement avec la remontée de fontis (figure 4). Le cas intermédiaire des marnes peu cimentées, présentant une très faible résistance au cisaillement et à la traction, permet d'observer des cheminées présentant des formes de cylindres verticaux très réguliers.

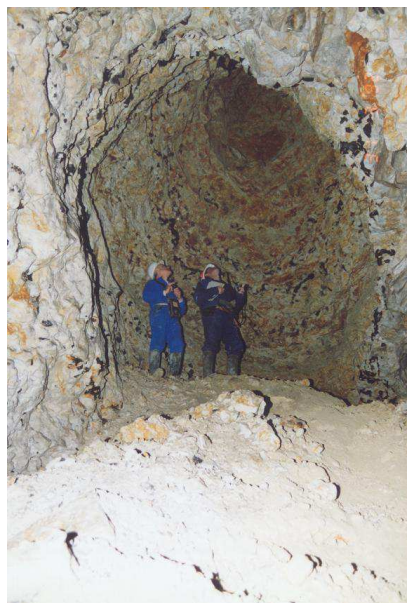


Figure 4 : Montée de voûte dans une carrière de craie (Nord).

Figure 4 : Caving above a room in a chalk mine (North of France)

3. La troisième phase correspond à l'**effondrement de la surface**. Lorsque aucune configuration spécifique n'est parvenue à bloquer la propagation de la remontée de voûte, le fontis finit par déboucher au jour sous forme d'un cratère (figure 5). Les dimensions de fontis varient fortement d'un site à l'autre. Ils dépendent notamment de la dimension des vides sous-jacents, de la profondeur d'exploitation ainsi que de la nature des terrains de recouvrement et, en particulier, des terrains de sub-surface. En fonction de ce dernier paramètre, les parois du cratère peuvent ainsi, au moment de l'apparition en surface, être sub-verticales ou légèrement inclinées (figure 6a). La forme classique d'entonnoir ne s'acquiert en général que progressivement, sous l'effet des intempéries sur les terrains superficiels (figure 6b). Dans la plupart des cas, le diamètre des fontis varie de quelques mètres à une quinzaine de mètres mais, dans certaines configurations exceptionnelles, il peut dépasser une cinquantaine de mètres. La profondeur du cratère dépend également de la profondeur d'exploitation et des dimensions des vides. Elle peut atteindre une dizaine de mètres, voire plus, même si, dans la majorité des cas, elle se limite à quelques mètres (Gray et al., 1977).

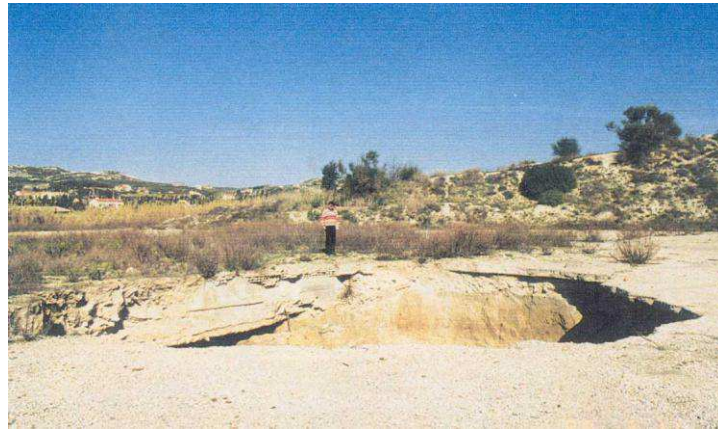


Figure 5 : Exemple de cratère débouchant en surface (carrière de gypse de Saint-Pierre-les-Martigues).

Figure 5 : Example of a sinkhole overlying a gypsum mine (Saint-Pierre-les Martigues, France)



Figures 6a et 6b : Parois de fontis sub-verticales après effondrement de la surface (a), dans le même secteur, ancien fontis présentant une allure de cuvette (b).

Figures 6a and 6b : Subvertical sinkhole walls (a) ; in the vicinity of (a), old sinkhole as a smooth topographic depression (b).

2.2 Un phénomène dangereux et relativement fréquent

Si le développement d'une chute de toit et la propagation d'une montée de voûte vers la surface sont des phénomènes généralement lents qui peuvent se développer durant plusieurs années ou décennies, l'apparition du cratère en surface (figures 7a et 7b) se fait, quant à elle, de manière soudaine, ce qui rend le phénomène potentiellement dangereux pour les personnes et les biens situés dans son emprise (Van der Merwe & Madden, 2002).



Figures 7a et 7b : Exemples de conséquences sur une infrastructure (a) et du bâti (b).

Figures 7a and 7b : Examples of sinkhole consequences on a road (a) and a building (b)

Il est très difficile d'estimer le nombre de fontis qui se développent chaque année sur l'ensemble d'un territoire. Beaucoup passent, en effet, totalement inaperçus (zones de forêt ou de friches) et de nombreux autres sont traités rapidement, sans déclaration préalable, pour limiter notamment les impacts sur les activités agricoles.

D'une manière générale, compte tenu de l'extension souvent limitée du désordre, dès lors que les entonnoirs de fontis se développent au sein de zones non bâties, les conséquences restent généralement limitées, hormis quelques cas atypiques (figure 8).



Figure 8 : Vache victime de l'apparition d'un fontis sur la commune de Tucquegnieux (source Républicain Lorrain, édition du 20/05/07).

Figure 8 : A cow as a victim of a sinkhole in Tucquegnieux town (Lorraine, France)

En revanche, lorsque les instabilités peuvent affecter des zones aménagées, les dégâts induits sur le bâti ou les voiries sont souvent importants et coûteux pour la collectivité (figures 9a et 9b), même si, les victimes sont, heureusement, relativement rares.



Figures 9a et 9b : Cratères de fontis ayant donné lieu à des victimes ces dernières années sur le territoire français : Chanteloup-les-Vignes (a) et Neuville-sur-Authou (b, source CETE/MEEDDAT).

Figures 9a and 9b : Deadly sinkholes occurred last years in France : Chanteloup-les-Vignes (a) and Neuville-sur-Authou (b, source CETE/MEEDDAT).

2.3 Les mécanismes permettant de stabiliser une montée de voûte

Plusieurs mécanismes peuvent conduire à la stabilisation d'une montée de voûte initiée au toit d'une galerie. Parmi les trois principaux détaillés dans ce qui suit, seul le dernier (auto-comblement par foisonnement des terrains éboulés) sera examiné dans la suite de l'article.

1. Le premier mécanisme résulte de **l'existence d'un banc suffisamment épais résistant et peu fracturé au sein des terrains de recouvrement**. Dans ce cas, la montée de voûte vient « se bloquer » sur cette poutre stable dans le long terme et le processus de propagation vers la surface s'arrête. Des formulations mathématiques issues de la Résistance Des Matériaux permettent de réaliser une modélisation analytique de la stabilité de ce banc soumis à flexion (Timoshenko & Woinowsky-Krieger, 1940). Elles requièrent une bonne connaissance des caractéristiques du banc considéré (épaisseur, résistance, fracturation, etc.), de l'état de contrainte dans le massif ainsi que des caractéristiques mécaniques des terrains et de la géométrie des cavités (portée de toit non soutenue notamment). Suivant la configuration géologique et d'exploitation retenue, plusieurs hypothèses peuvent être formulées qui sont susceptibles d'influer fortement sur le choix des formulations à utiliser (théorie des poutres épaisses ou minces en fonction de l'épaisseur du banc comparé à la portée non soutenue, théorie des poutres ou des plaques en fonction de la géométrie de la surface du toit soumis à flexion, bords libres ou encastres en fonction de la nature des horizons rocheux qui environnent le banc considéré, etc.). Suivant la complexité, notamment géométrique, du problème et la nécessité d'intégrer au calcul la présence d'hétérogénéités, le recours à des modélisations numériques peut également être envisagé (Laouafa & Tritsch, 2005).
2. Le second mécanisme correspond à la **formation d'une « voûte auto-stable »**. Même en l'absence d'un banc massif présent au sein du recouvrement, le développement de la cloche d'éboulement peut conduire à la formation d'une voûte auto-stable. Selon la forme de cette voûte, la résistance des terrains et l'état des contraintes régnant dans le massif,

l'éboulement peut, en effet, se stabiliser durablement dans le temps. Ce type de mécanisme se rencontre en particulier au sein de terrains stratifiés composés de bancs relativement peu épais (alternances marno-calcaires par exemple) ou au sein de massifs homogènes peu résistants ou, au contraire résistants mais fracturés (craie, granite, gneiss, etc.). Initié par une large chute de toit au niveau d'un carrefour, l'éboulement se propage ensuite avec un rayon de montée de voûte diminuant au fur et à mesure de la progression vers la surface, jusqu'à prendre la forme d'un demi-ovoïde plus ou moins élancé suivant la nature des terrains traversés. Pour ce second mécanisme, plusieurs approches analytiques sont également disponibles pour évaluer la propension que présente une chute de toit de donner naissance à une voûte auto-stable (Terzaghi, 1946 ; Hoek & Brown, 1980). Différents travaux s'appuyant sur des modélisations numériques ont également approché le problème (Poirot et al., 2001 ; Abbass et al., 2003) Quelle que soit l'approche retenue, une connaissance détaillée des caractéristiques du recouvrement (résistance, stratigraphie fine) et des dimensions de la cavité est indispensable pour mener à bien la démarche dans des conditions optimales.

3. Le troisième et dernier mécanisme résulte de l'**auto-comblement par foisonnement des terrains**. Ceci traduit le fait qu'une montée de voûte voit sa propagation vers la surface s'achever du fait de la disparition du vide présent à la base de la cloche d'éboulement. Cette diminution de l'espace disponible s'explique par le phénomène de foisonnement des terrains éboulés qui traduit l'augmentation de volume entre les matériaux en place et la même quantité de matériau, une fois éboulé. Les éboulis forment, au mur de la galerie, un cône qui se répand dans l'espace disponible. La propagation vers la surface de la montée de voûte alimente le phénomène et fait progressivement grossir le tas d'éboulis qui s'étale peu à peu dans la galerie et s'élève vers le toit de la cavité. Lorsque le cône d'éboulis finit par atteindre le toit de la cavité éboulée, il bloque la base de la cloche d'éboulement puis commence à combler la montée de voûte elle-même. Si les matériaux foisonnés finissent par combler entièrement cette cheminée, il n'y a plus de vide disponible pour la poursuite du phénomène. En l'absence d'éléments susceptibles de remobiliser les remblais (pendage des travaux, écoulement d'eau, tassement), le processus se stabilise alors et le fontis n'atteint pas la surface (Piggot & Eynon, 1978). Pour déterminer si un départ de cloche de fontis est de nature à se stabiliser par auto-comblement, il convient donc de déterminer pour quelle quantité de matériau foisonné (et donc quelle hauteur de montée de voûte), le cône d'éboulis est susceptible de combler l'espace disponible dans la galerie ainsi que la montée de voûte. Si cette hauteur est inférieure à l'épaisseur de recouvrement, la montée de voûte s'arrête naturellement. Dans le cas contraire, la cloche d'éboulement peut se développer jusqu'en surface et donner naissance à un entonnoir de fontis.

Même si le blocage d'une cloche de fontis relève souvent d'une combinaison des trois mécanismes décrits ci-avant, nous nous concentrerons, dans le cadre de cet article, sur le mécanisme d'auto-comblement par foisonnement des terrains, en détaillant le modèle analytique mis en œuvre pour mieux appréhender la hauteur prévisible de fontis que l'on peut déterminer au travers de cette approche.

3 Modélisation volumétrique de l'auto-comblement

3.1 Approches préexistantes

L'analyse du risque de remontée de fontis en surface a fait l'objet de diverses approches visant toutes à définir l'épaisseur de recouvrement au-delà de laquelle le risque d'apparition de fontis en surface peut être écarté. Trois catégories d'approches ont ainsi été développées. La première repose sur la définition d'une valeur seuil forfaitaire, la seconde sur

l'établissement de lois empiriques simples. Enfin, la troisième s'appuie sur une modélisation volumétrique du phénomène de montée de voûte.

3.1.1 Valeurs seuils forfaitaires

Il est communément admis que l'apparition en surface de phénomènes de type fontis qui se développent à l'aplomb d'anciennes exploitations souterraines exploitées par chambres et piliers abandonnés ne concerne généralement que les travaux relativement peu profonds.

La bibliographie la plus nombreuse concerne les bassins miniers de charbon qui se sont développés de par le monde. En termes d'épaisseurs de recouvrement seuils au-delà desquelles les risques de fontis peuvent être écartés, Bruhn et al. (1982) puis Hao et al. (1991) avancent ainsi des valeurs variant entre une vingtaine et une quarantaine de mètres, respectivement pour des bassins houillers en Pennsylvanie et en Illinois. Dans le même ordre d'idée, il était classiquement considéré dans les exploitations houillères britanniques que les travaux situés à une profondeur supérieure à 30 mètres ne posaient pas de problème en terme de stabilité des terrains de surface (Mc Millan & Browne, 1987)

Des retours d'expérience menés sur plusieurs bassins miniers français, sud-africains et d'autres bassins miniers nord-américains (Wyoming notamment) mettent en évidence une valeur voisine d'une cinquantaine de mètres environ (Darton, 1906 ; Van der Merwe & Madden, 2002 ; Didier & Josien, 2003).

Une démarche consistant à considérer que tout secteur d'exploitation situé à des profondeurs inférieures à ces valeurs seuils présente des risques importants d'apparition de fontis en surface conduit, dans la plupart des cas, à surestimer sensiblement le niveau de risque réel. Les valeurs prises comme référence correspondent en effet à la valeur maximale rencontrée dans la configuration considérée.

A l'inverse, il convient de noter que ces valeurs ne sont plus valables en présence de configurations géologique ou d'exploitation spécifiques (vides de grandes dimensions, terrains non foisonnants constituant le recouvrement) ou dans le cas particulier où les éboulis peuvent être évacués latéralement (Dunrund & Osterwald, 1980).

Même si elles permettent de fournir des ordres de grandeur utiles en première approche, les valeurs seuils forfaitaire doivent donc être précisées par des approches permettant de définir plus finement les secteurs soumis réellement à un risque de remontées de fontis jusqu'en surface.

3.1.2 Approches empiriques

La « règle des 10 H »

La règle empirique la plus connue et la plus appliquée en géotechnique est sans nul doute la règle des « 10 fois la hauteur de galerie ». Enoncée notamment par le « National Coal Board » en Grande Bretagne, elle a longtemps fait autorité, principalement dans le contexte des mines de charbon britanniques (NCB, 1982). Selon cette règle, dès lors que l'épaisseur de recouvrement est supérieure ou égale à 10 fois la hauteur du vide souterrain, le risque de fontis (et, plus généralement, tout risque de mouvement de terrain) peut être écarté. Une étude menée sur plus de 150 montées de voûte observées au sein d'anciens travaux miniers mis à nu par le décapage des terrains de surface entrepris dans une vingtaine de mines de charbon britanniques reprises à ciel ouvert a conduit les auteurs à diminuer légèrement cette valeur à environ 7 fois l'ouverture des travaux (Garrard & Taylor, 1988).

La « règle de Vachat »

Dans une étude très détaillée basée sur de nombreuses observations menées au sein d'anciennes carrières de calcaire et de gypse de la région parisienne, Vachat (1982) avance pour sa part la règle du $1/15^{\text{ème}}$. Selon cette règle, il est nécessaire que l'épaisseur de recouvrement soit supérieure ou égale à 15 fois la hauteur de galerie pour que le risque de remontée de fontis puisse être écartée (Vachat, 1982). Cette règle s'avère donc sensiblement plus contraignante que celle formalisée par le NCB puisqu'elle contribue à requérir une épaisseur de recouvrement de 50% supérieure à celle énoncée par le NCB, pour une ouverture de galerie identique.

Avantages et limites des approches empiriques

L'avantage majeur d'une approche empirique réside dans sa simplicité d'utilisation. Dans le cas présent, le nombre de paramètres variable requis pour déterminer l'épaisseur de recouvrement critique est réduit à sa plus simple expression puisque seule l'ouverture des travaux est nécessaire pour utiliser les formulations proposées. L'élaboration d'un diagnostic n'exige donc pas de reconnaissance systématique de terrain puisque l'analyse de plans d'archives suffit souvent à la mise en œuvre de « calculs de coin de table » permettant d'estimer la sensibilité d'un site. Le coût et la durée de l'analyse s'en voient, de fait, considérablement réduits.

Plusieurs limites importantes doivent toutefois être formulées. En premier lieu, on notera que les approches empiriques sont d'autant plus fiables que les éléments à analyser sont homogènes et proches de ceux ayant servi à l'élaboration de la règle. En d'autres termes, si une règle empirique est particulièrement bien adaptée à des échantillons « classiques », elle l'est beaucoup moins à des échantillons « atypiques ». Or, les exploitations souterraines peuvent présenter un très large panel de contextes. Dès lors, la non-prise en compte de la méthode d'exploitation, de la géométrie des vides et de la nature des matériaux rocheux limite considérablement la possibilité d'identifier certains cas spécifiques (très grande hauteur de vide par exemple) qui sortent clairement du contexte dans lequel la règle a été établie. Il est ainsi possible de trouver des cas de fontis ayant débouché au droit d'anciennes carrières souterraines du bassin parisien et pour lesquels la règle de Vachat n'a pas été respectée (et parfois loin s'en faut). De même, un retour d'expérience récent met en évidence les limites de la règles du « 10 H » dans le contexte britannique (Taylor & Fowell, 2007).

Enfin, et surtout, on notera que les approches empiriques sont toujours établies en s'appuyant sur l'analyse de données recueillies dans un contexte spécifique (secteur géographique, type d'exploitation, etc.). De fait, bien que tentante pour les raisons évoquées juste avant, toute tentative de généralisation de ces règles qui tendrait à les rendre applicables à l'ensemble des cavités souterraines doit être formellement proscrite. A titre d'exemple, on notera la différence sensible entre la règle de Vachat et celle des « 10 H » qui provient du fait que ces deux règles ont été établies dans des contextes différents. Ceci illustre bien le fait qu'il n'existe donc aucune règle empirique fiable et adaptée pour le diagnostic de l'ensemble des contextes de cavités.

3.1.3 Approches volumétriques

Pour tenter de contourner ces limites, d'autres démarches, basées sur une approche déterministe ont également été mises en œuvre. Elles sont basées sur l'évaluation du volume nécessaire pour que les éboulis combleront la galerie et la cloche d'éboulement. Ces formulations permettent d'en déduire la hauteur de montée de voûte garantissant un auto-comblement de l'instabilité. De telles approches ne dépendent donc pas d'un contexte géographique spécifique. Elles sont adaptables à toutes les exploitations souterraines, pour peu que l'on dispose des paramètres caractérisant l'environnement des vides. Diverses

formulations, plus ou moins élaborées ont été proposées par différents auteurs. Les plus classiques sont décrites ci-dessous.

Modèle de Pigott & Eynon (1978).

Le modèle le plus ancien et le plus simple a été proposé par Pigott et Eynon:

$$z = \frac{3h_g}{f-1} \quad (1)$$

Avec z : hauteur de remontée de voûte permettant de garantir l'auto-comblement,

h_g : ouverture de la galerie

f : coefficient de foisonnement des terrains éboulés.

Ce modèle constitue une transition naturelle entre les approches empiriques et volumétriques dans la mesure où il exprime une proportionnalité entre la hauteur de remontée de voûte et l'ouverture des travaux, pondérée toutefois par l'effet du foisonnement qui introduit dans la formulation la prise en compte des caractéristiques des terrains de recouvrement (Pigott & Eynon, 1978). Cette approche équivaut à une modélisation 1D corrigée (les éboulis doivent remplir la voûte et l'espace de la galerie à son strict aplomb). Le facteur de proportionnalité (ici pris constant et égal à 3) permet de prendre en compte forfaitairement l'effet d'épandage latéral du tas d'éboulis.

Modèle de Vachat (1982)

A partir des observations de terrain ayant donné lieu à l'établissement de sa règle empirique, Vachat propose d'intégrer au calcul différents facteurs de proportionnalité autorisant la prise en compte de certaines des spécificités des cavités étudiées (Vachat, 1982). Ainsi, sont introduits :

- le coefficient de forme K_v , variant entre 1 et 3 et permettant de tenir compte de la forme de la montée de voûte (1 pour un cylindre, 2 pour une voûte parabolique, 3 pour un cône).
- le coefficient de site K_g , permettant d'intégrer la présence dans les galeries d'éléments occupant l'espace et réduisant, de fait, le volume accessible pour l'épandage du cône d'éboulis (0 si ceinture maçonnée confinant les éboulis au droit de la chute de toit ; 0,6 si 4 piliers proches ; 1 si aucun pilier à proximité immédiate).

Dès lors, la formulation analytique de la hauteur de remontée de cheminée, z , est la suivante

$$z = \frac{K_v h_g}{f-1} \left(\frac{K_g h_g^2}{3r^2 \tan^2 \alpha} + \frac{K_g h_g}{r \tan \alpha} + 1 \right) \quad (2)$$

Avec r , rayon de remontée de cheminée et α , angle de dépôt des éboulis.

Bien que sensiblement plus élaboré que le modèle de Pigott, l'approche volumétrique proposée par Vachat n'en reste pas moins teintée d'une forte composante empirique avec des coefficients établis sur la base d'observations menées dans un contexte particulier.

Modèle de Whittaker & Reddish (1989).

Le modèle de Whittaker et Reddish propose pour sa part une modélisation 2D corrigée. Principalement conçu pour une configuration d'exploitation par chambres et piliers abandonnés présentant une maille carrée de largeur de galerie a , il peut également, moyennant modification, être adapté à une configuration de galerie isolée (Whittaker & Reddish, 1989).

Cette approche s'appuie sur un certain nombre d'hypothèses simplificatrices. Le volume accessible en galerie est ainsi défini par le parallélépipède occupant l'intégralité du carrefour (base carrée de côté b et hauteur h_g). A ceci s'ajoute, en fonction de la configuration d'exploitation (chambres et piliers ou galeries), des « prismes » correspondant à l'épandage latéral des éboulis, depuis le toit de la galerie en bordure de carrefour, selon leur angle de talus naturel α . Dans une telle approche, on obtient :

$$z = \frac{4}{\pi r^2 (f - 1)} \left(b h_g^2 \cot \alpha + h_g b^2 \right) \quad (3)$$

Contrairement aux précédents, ce modèle intègre, de manière déterministe, la majeure partie des grandeurs physiques susceptibles d'influer sur le développement du phénomène de fontis (géométrie du vide souterrain, caractéristiques des éboulis). On notera en revanche que, quel que soit le rayon de montée de voûte, r , le calcul du volume du tas d'éboulis intègre systématiquement l'intégralité du parallélépipède définissant le carrefour de galerie.

3.2 Vers une modélisation 3D du mécanisme d'auto-comblement

3.2.1 Principes d'élaboration du modèle

Confronté régulièrement à la problématique du diagnostic du risque de remontée de fontis dans des contextes géologiques et d'exploitation très variables (carrières de gypse ou de calcaire, mines de fer ou de charbon, etc.), l'INERIS a développé un modèle analytique volumétrique permettant de restituer au plus juste le phénomène de développement d'un cône d'éboulis de fontis. Etabli il y a une dizaine d'années, ce modèle a été progressivement enrichi et validé au travers de nombreuses études menées dans différentes configurations.

Il se base sur la modélisation volumétrique des éboulis induits par la rupture du toit d'une exploitation, éboulis qui s'amoncellent au sol de la cavité avant de la combler progressivement jusqu'à pouvoir interrompre, par auto-foisonnement le processus de dégradation. Si les formulations diffèrent, notamment pour ce qui concerne l'application à diverses configurations d'exploitation, le démarche se rapproche de différents travaux menés par ailleurs (Dyne, 1998 ; Delfaut, 2007).

Les formulations proposées plus avant seront établies avec les mêmes notations que celles proposées dans les formules précédentes.

b : largeur de galerie.
h_g : hauteur de galerie.
r : rayon de chute de toit initiant la montée de voûte.
f : coefficient de foisonnement des terrains.
α : angle de talus naturel des éboulis.
z : hauteur de remontée de cheminée.
V_x : volumes définis à différents étapes du calcul.

La configuration d'exploitation la plus commune correspond à une chute de toit prenant naissance au centre d'un carrefour de galeries au sein d'une exploitation menée par chambres et piliers abandonnés. C'est sur la base de cette géométrie que nous développerons l'établissement du modèle même si, comme cela est décrit plus loin, la démarche peut être étendue à bien d'autres configurations d'exploitation.

Comme précisé plus haut, le modèle se focalise sur le mécanisme d'auto-foisonnement. On suppose donc, dans ce qui suit, qu'aucun banc présent dans le recouvrement n'est de nature à bloquer le phénomène de montée de voûte.

Selon le même principe que celui des modèles volumétriques précédemment décrits, le calcul s'attache à déterminer le volume de matériaux éboulés ($f.V_{voûte}$) requis pour que, une fois foisonnés, ils puissent combler à la fois le volume disponible en galerie ($V_{cône-galerie}$) mais également le volume de la montée de voûte ($V_{voûte}$). Ceci s'exprime au travers de l'équation :

$$f.V_{voûte} = V_{cône-galerie} + V_{voûte} \quad (4)$$

L'objectif est d'établir les formulations de ces différents termes. Il devient alors possible de résoudre l'équation avec pour variable, la grandeur z caractérisant la hauteur de remontée de voûte pour laquelle on obtient la stabilisation du phénomène (égalité des deux membres de l'équation).

En première approximation, pour simplifier la formulation analytique, on supposera que la montée de voûte prend la forme d'un cylindre régulier de rayon r .

$$V_{voûte} = \pi r^2 z \quad (5)$$

Une telle hypothèse s'avère adaptée à un recouvrement majoritairement constitué de marnes faiblement consolidées et donc très peu résistantes aux efforts de traction ou de cisaillement. Lorsque le recouvrement est constitué de terrains sensiblement plus cohérents, d'autres formulations peuvent être retenues. Elles seront décrites plus loin.

L'établissement de la formule caractérisant le volume accessible en galerie est sensiblement plus complexe. Ce dernier correspond globalement au volume d'un cône tronqué renversé (de rayon supérieur égal au rayon de la chute de toit et d'angle à la base égal à l'angle de dépôt des éboulis, $V_{cône-total}$). Il vient :

$$V_{cône-total} = \frac{\pi h_g}{3} \left[r^2 + h_g \cot \alpha \left(r + h_g \cot \alpha \right) \right] \quad (6)$$

Il convient néanmoins de soustraire éventuellement à ce volume celui correspondant aux angles de piliers encadrant le carrefour affecté par la chute de toit et qui peuvent interférer avec le cône d'éboulis (figure 10).

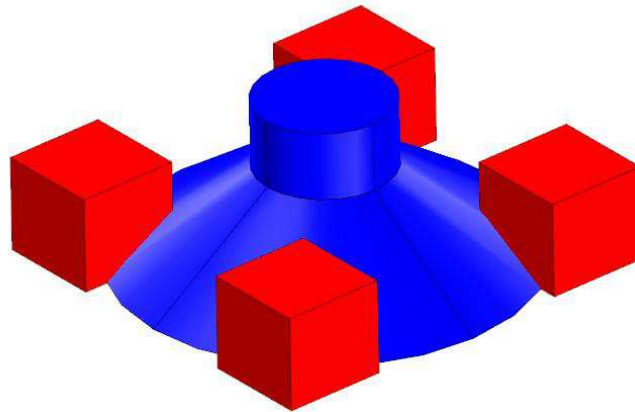


Figure 10 : Volume d'éboulis se répandant dans les galeries et interférant avec les piliers voisins.

Figure 10 : Collapsed material spreading within the galleries and stopped by pillars

L'exploitation souterraine ne peut en effet être assimilée à un milieu infini et, à partir d'une certaine quantité d'éboulis, les bords du cône sont susceptibles d'atteindre les angles des piliers voisins. $V_{\text{cône-piliers}}$ étant le volume de piliers interrompant la progression de l'éboulis, il vient dès lors :

$$V_{\text{cône-galerie}} = V_{\text{cône-total}} - V_{\text{cône-piliers}} \quad (7)$$

Au vu de la figure 11, le volume caractérisé par l'intersection entre le cône théorique et les piliers voisins peut être assimilé, à une marge d'erreur très limitée près, à la somme de quatre « quarts de cône » de rayon r^* et d'angle à la base α . Le rayon r^* s'exprime :

$$r^* = r + h_g \cot \alpha - \frac{a\sqrt{2}}{2} \quad (8)$$

Dès lors, on peut calculer le volume occupé par quatre quarts de cône, à savoir le volume d'un cône de rayon r^* et d'angle à la base α . On obtient d'après (8) :

$$V_{\text{cône-piliers}} = \frac{\pi}{3} r^{*2} \tan \alpha = \frac{\pi}{3} \left[\left(r + h_g \cot \alpha - \frac{a\sqrt{2}}{2} \right)^2 \tan \alpha \right] \quad (9)$$

Dès lors, l'équation (4), peut s'écrire:

$$f \pi r^2 z = \frac{\pi}{3} \left\{ h_g \left[r^2 + h_g \cot \alpha \left(r + h_g \cot \alpha - \frac{a\sqrt{2}}{2} \right) \tan \alpha \left(r + h_g \cot \alpha - \frac{a\sqrt{2}}{2} \right)^2 \right] \right\} + \pi r^2 z \quad (4\text{bis})$$

En résolvant cette équation en z , il vient :

$$z = \frac{1}{3r^2(f-1)} \left\{ h_g \left[r^2 + h_g \cot \alpha \left(r + h_g \cot \alpha - \frac{a\sqrt{2}}{2} \right) \tan \alpha \left(r + h_g \cot \alpha - \frac{a\sqrt{2}}{2} \right)^2 \right] \right\} \quad (10)$$

Cette expression permet de calculer la hauteur de remontée de cheminée nécessaire à un auto-comblement de l'instabilité. Il est alors possible de comparer cette valeur avec l'épaisseur de recouvrement. Si elle lui est inférieure, l'auto-comblement est prévisible. Si elle lui est supérieure, le fontis débouchera au jour.

3.3 Extension à différentes configurations d'exploitation

Il existe de nombreuses autres configurations d'exploitation que celle retenue ci-dessus pour établir les formulations analytiques des volumes mis en jeu dans le développement du phénomène de fontis. En fonction du schéma de dimensionnement de l'exploitation souterraine, le vide disponible peut varier considérablement (chambres et piliers ou galeries filantes de différentes formes par exemple). La méthode d'exploitation utilisée influera donc directement sur le résultat de z . De même, la forme de la montée de voûte au travers du recouvrement joue un rôle primordial dans la mise en équation de la problématique.

Diverses formulations peuvent ainsi être établies et appliquées à la démarche générale en fonction des contextes rencontrés. Quelques-unes sont explicitées ci-dessous.

3.3.1 Forme de la montée de voûte

L'hypothèse d'une cheminée cylindrique n'est pas applicable à tout type de terrains de recouvrement. Pour généraliser l'analyse, nous proposons de considérer dans ce qui suit des formes de montées de voûte susceptibles de varier sensiblement en fonction de la nature des terrains du recouvrement. Pour proposer un large panel de formes de voûtes tout en autorisant une mise une équation simplifiée du problème, on prendra le parti de considérer des sections de l'enveloppe de la voûte vérifiant l'équation $y = K x^n$, où l'exposant n permet de décrire la forme de la courbe correspondant au mieux aux observations de terrain (figure 11).

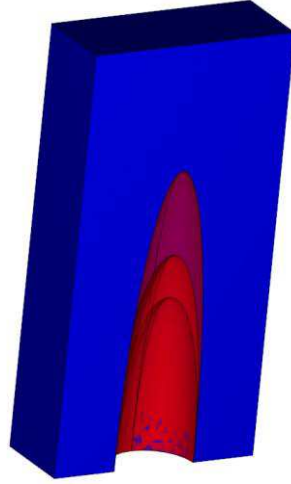


Figure 11 : Différents profils de montées de voûte observables en toit de galerie.

Figure 11 : Different patterns of collapse-chimney above a mining roadway.

Pour s'assurer que la hauteur de voûte est égale à z et que sa base correspond bien à un cercle de rayon r , l'équation de la monte de voûte doit s'exprimer :

$$y = z \left[1 - \left(\frac{|x|}{r} \right)^n \right] \quad (11)$$

Pour laquelle la notation $|x|$ correspond à la valeur absolue de x .

Dès lors, il est possible de calculer le volume du demi-ellipsoïde de révolution dont le volume est équivalent à celui de la montée de voûte. Il vient :

$$V_{\text{voûte}(n)} = \int_0^z \pi x^2 dy = \int_0^r \frac{\pi n z}{r^n} x^2 x^{n-1} dx = \int_0^r \frac{\pi n z}{r^n} x^{n+1} dx = \left[\frac{n}{(n+2)r^n} \pi z x^{n+2} \right]_0^r = \frac{n}{n+2} \pi r^2 z \quad (12)$$

On peut dès lors en tirer l'équation qui permet e « corriger » la valeur de z dès lors qu'on tient compte de la forme de la voûte qui se développe au sein du recouvrement.

$$\boxed{z_{\text{corr}} = \frac{n+2}{n} z} \quad (13)$$

Lorsqu'il est possible d'accéder aux travaux souterrains et d'observer des montées de voûte en phase d'évolution vers la surface, on peut caler, au mieux, la forme de voûte la plus représentative au regard de l'abaque donné figure 12. On en tire alors la valeur de l'exposant n que l'on reporte dans les équations (10) puis (13) pour en déduire la valeur de z_{corr} .

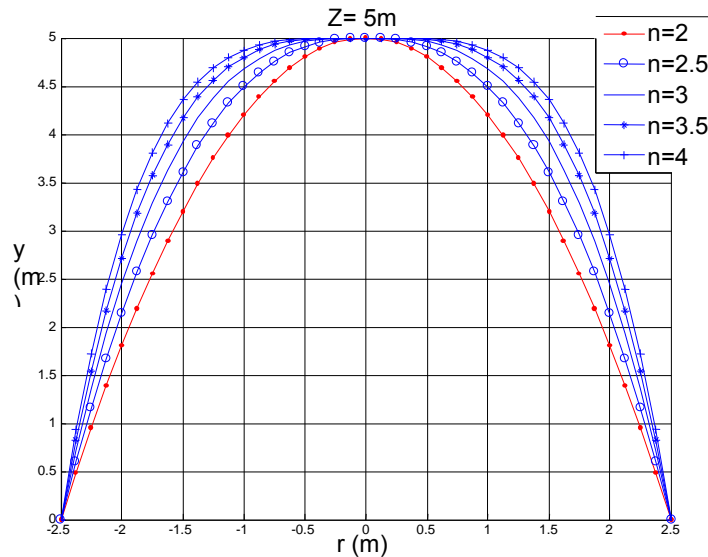


Figure 12 : Abaque de calage de la forme des remontées de voûte en fonction de l'indice n .

Figure 12 : Abacus giving collapse-chimney pattern according to the n index

3.3.2 Remontée de fontis au toit d'une galerie isolée

Les phénomènes de montées de voûte ne sont pas propres aux exploitations par chambres et piliers. Ils peuvent se développer dans tout type d'exploitation dès lors que de l'espace est disponible au sein des vieux travaux pour permettre l'amoncellement d'éboulis. Les éléments suivants s'attachent à préciser le cas spécifique des galeries isolées de forme trapézoïdale.

Le calcul du volume disponible en galerie pour accueillir le cône tronqué amputé de deux parties de ses flancs venant buter sur les parois de la galerie s'avère relativement délicat (figure 13).

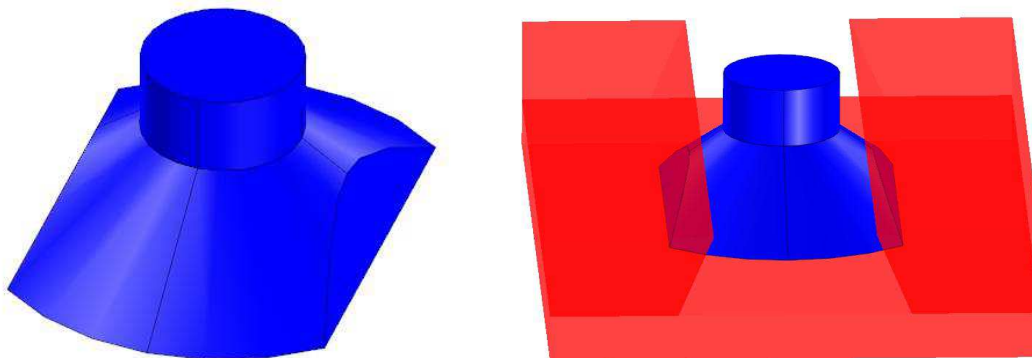


Figure 13 : Vue du volume d'éboulis répandu dans une galerie trapézoïdale.

Figure 13 : 3D View of collapsed material within a trapezoidal mining roadway.

Si on souhaite se limiter à une approche analytique, la méthode la plus commode consiste à se placer en coordonnées cylindriques afin de modéliser un quart du cône doublement tronqué sachant que le problème possède deux axes de symétrie (plans longitudinal et transverse de la galerie).

Le volume recherché prend la forme :

$$V_{\text{galerie-trap}} = 4(A + B + C)$$

Où les différents membres du terme de droite, une fois simplifiés, prennent la forme :

$$A = \frac{\pi}{4} (r \cdot z_0^2 \cot \alpha - \frac{z_0^3 \cot^2 \alpha}{3} - r^2 z_0)$$

$$B = \frac{1}{2} \int_{-h_g}^{z_0} \left[\frac{(a - 2h_g \cot \beta)}{2} - z \cot \beta \right]^2 \cot \theta_0(z) dz$$

$$C = \frac{1}{2} \int_{-H}^{z_0} \left[\frac{(a - 2h_g \cot \beta)}{2} - z \cot \alpha \right]^2 \theta_0(z) dz$$

Avec

$$z_0 = \frac{r - \frac{a}{2} + h_g \cot \beta}{\cot \alpha - \cot \beta} \quad \text{et} \quad \theta_0 = \arcsin \left[\frac{\frac{(a - 2h_g \cot \beta)}{2} - z \cot \beta}{r - z \cot \alpha} \right]$$

avec la notation complémentaire :

- β : angle de la paroi de la galerie trapézoïdale avec la verticale.

Si l'intégrale A peut être résolue analytiquement, les termes B et C ne permettent pas de trouver de primitives analytiques simples. Il faut dès lors avoir recours à une résolution numérique de ces intégrales (méthode de Gauss par exemple). Le recours à un tableur permet de résoudre les équations (10) ou (13) et de déterminer la hauteur prévisible de remontée de voûte requise pour auto-comblement du fontis.

4 Les principaux paramètres influant sur la hauteur de remontée de fontis

Au regard des formulations analytiques, il apparaît nettement que certains paramètres jouent un rôle essentiel sur le résultat des calculs : rayon de montée de voûte, coefficient de foisonnement et angle de dépôt des éboulis. Ces différents paramètres sont discutés dans les paragraphes suivants.

4.1 Le rayon de montée de voûte

Une étude de sensibilité des résultats de hauteur prévisible de remontée de fontis met clairement en évidence que le rayon de remontée de cheminée joue un rôle primordial sur le résultat des calculs. Le carré de ce rayon apparaissant au dénominateur de la formule exprimant la valeur de z , dès lors que ce rayon diminue, la hauteur prévisible de remontée de fontis croît rapidement. La figure 14 met en évidence la forte influence d'une variation de ce rayon de remontée dans le cas d'une exploitation par chambres et piliers présentant une

ouverture de 2 m pour une largeur de galerie de 4 m, avec un coefficient de foisonnement des terrains de 1,3.

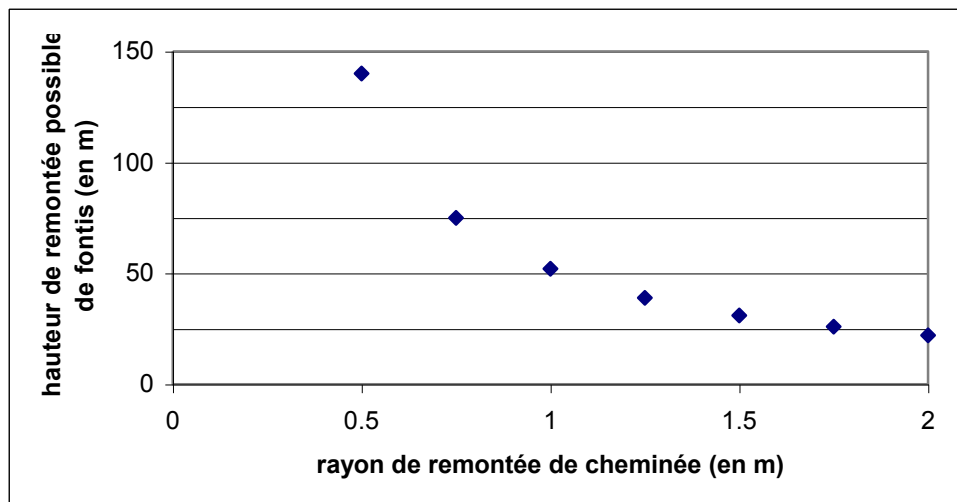


Figure 14 : Influence du rayon de cheminée sur la hauteur prévisible de remontée de fontis.

Figure 14 : Influence of collapse-chimney radius on chimney height.

Ce résultat s'explique par le fait que plus la chute de toit est importante, plus le volume de matériau éboulé est élevé et, du fait du foisonnement, plus le volume de vide accessible peut être rapidement comblé. A l'inverse, pour un rayon de remontée de cheminée faible, le volume d'éboulis mis en jeu reste très limité et il devient dès lors très difficile de combler le volume de vide accessible au sein des galeries.

Ce raisonnement présente évidemment des limites et ne peut être poussé jusqu'à l'absurde. Ainsi, théoriquement, une remontée de cheminée de quelques centimètres de diamètre pourrait traverser plusieurs centaines de mètres de recouvrement sans parvenir à combler la galerie sous-jacente. Un tel scénario n'a évidemment aucune crédibilité physique. Les rayons de chute de toit et de montée de voûte doivent en effet être réalistes au regard d'une part des dimensions des galeries et, d'autre part, des propriétés de résistance des bancs du recouvrement.

Il n'est pas aisé de définir, de manière déterministe, la valeur de ce rayon compte tenu des données souvent incomplètes dont on dispose sur la lithologie du recouvrement et sur l'existence d'hétérogénéités au sein des bancs du toit. De fait, on privilégie, autant que faire se peut, une approche par retour d'expérience basée sur une reconnaissance visuelle des travaux encore accessibles. Une analyse des montées de voûte observées au fond permet alors de déterminer la gamme de valeur la plus réaliste du rayon de cheminée dans l'équation permettant de calculer la hauteur de montée de voûte.

Si les travaux ne sont plus accessibles, seule une approche empirique demeure envisageable (en dépit des limites mentionnées plus haut à propos de ce type d'analyse). Comme toute démarche de ce type, l'estimation doit s'appuyer sur un principe sécuritaire tout en restant aussi réaliste que possible. Ainsi, l'hypothèse très fréquemment adoptée qui consiste à prendre comme diamètre de remontée de voûte la largeur intégrale du toit de la galerie (ou du carrefour de galeries) ne joue pas dans le sens de la sécurité. Une telle hypothèse maximise en effet la valeur du rayon de cheminée avec pour conséquence de minimiser la hauteur prévisible de remontée de fontis. A l'inverse, comme précisé plus haut, la valeur de ce rayon doit être suffisamment importante au regard de la largeur des galeries et de la nature des terrains de recouvrement.

Au regard du retour d'expérience que l'INERIS s'est forgé au cours de ces dernières années établi sur de nombreuses observations ou retours d'expérience collectés sur l'ensemble du territoire français, les experts géotechniciens de la Direction des Risques du Sol et du Sous-Sol considèrent que, sauf configurations exceptionnelles, les rayons de remontée de cheminée varient au sein d'une fourchette comprise entre 0,4 et 0,5 fois la largeur de galerie (ou de carrefour).

Aucune référence bibliographique ne nous a permis, pour l'heure, de confronter ce retour d'expérience à d'autres établis dans des contextes différents.

On notera qu'un tel intervalle de valeur, qui peut sembler a priori assez limité, peut parfois suffire à influencer de manière importante le résultat des calculs de hauteur de remontées de fontis. Toutes les informations disponibles (observations visuelles, retours d'expérience, rapports d'archives, résistance des bancs du toit, etc.) doivent donc être mises en œuvre pour préciser au plus juste cette valeur au regard de sa grande sensibilité sur les résultats escomptés. En l'absence d'informations complémentaires, le principe de précaution conduit à prendre la valeur inférieure de l'intervalle pour considérer une hauteur maximale possible de remontée de fontis.

4.2 Coefficient de foisonnement des terrains éboulés

On entend par coefficient de foisonnement, noté f , le rapport entre le volume de matériaux éboulés répandus en galerie et le volume initial occupé par la même quantité de matière initialement en place au sein des bancs du recouvrement. Cette augmentation de volume s'explique par le fait que les blocs s'amoncelant les uns sur les autres laissent des vides entre eux ce qui contribue à l'augmentation du volume apparent.

Le coefficient de foisonnement dépend étroitement de la nature du matériau mais également de la présence éventuelle d'eau. Ainsi, un matériau résistant qui se rompt en donnant naissance à de relativement gros blocs contribuera à laisser des vides interstitiels sensiblement plus importants que ceux générés par un sol fin non cohérent. A l'extrême inverse, lorsqu'un toit se rompt sous forme de dalles épaisses qui chutent en masse, à l'horizontale, sans se fractionner en de multiples blocs, le foisonnement peut être faible. Toujours dans cette logique de volume de vides interstitiels, un matériau dont la granulométrie des éboulis s'avère assez étalée aura tendance à faciliter le comblement des interstices et donc à limiter la valeur du coefficient de foisonnement.

En cas de recouvrement constitué par différents types de matériaux présentant des caractéristiques distinctes, une estimation d'un « coefficient de foisonnement moyen » peut être envisagé en pondérant les coefficients de foisonnement respectifs au prorata des épaisseurs des différentes couches.

La présence d'eau peut également influencer directement les propriétés de foisonnement des matériaux. C'est particulièrement le cas de matériaux sensibles à l'eau. Ainsi, certaines formations marneuses à l'état sec peuvent se rompre sous la forme de blocs de dimensions décimétriques assez favorables à un foisonnement relativement important. A l'inverse, en présence d'eau, ces marnes peuvent présenter un comportement plus plastique, allant jusqu'à se comporter comme une « pâte dentifrice » dépourvue d'un foisonnement significatif (figures 15a et 15b). Un tel comportement contribue à favoriser le développement et la propagation des voûtes.



Figures 15a et 15 b : vue de cônes d'éboulis en présence d'eau (b) ou non (a)

Figures 15a and 15b : Collapsed material with (b) or without (a) water.

La valeur des coefficients de foisonnement intrinsèques à différents types de matériau n'est pas une grandeur aisée à quantifier. Elle peut être estimée par retour d'expérience ou évaluée in situ de manière approchée car il est souvent difficile d'estimer le volume initialement en place. Là encore, à notre connaissance, rares sont les expérimentations réalisées sur ce sujet. On dispose donc de peu de résultats expérimentaux dans la littérature.

Une attention toute particulière peut être prêtée au retour d'expérience du terrassement routier. Selon les sources disponibles, les « Recommandations pour les Terrassement Routiers » donnent des valeurs de foisonnement variant de 1,05 (sables silteux) à 1,6 (porphyres, basaltes). Ces ordres de grandeur sont assez similaires à ceux obtenus par retour d'expérience dans le domaine de la géotechnique minière.

Il convient toutefois de noter que, pour adopter une démarche sécuritaire, la profession routière se doit de ne pas sous-estimer les valeurs de coefficient de foisonnement (volume et coût du matériau à transporter). A l'inverse, pour la géotechnique minière, une surestimation du coefficient de foisonnement ne joue pas dans le sens de la sécurité. Ceci explique probablement en partie les légères différences relevées entre les valeurs de référence établies par l'INERIS et celles émises par la profession du terrassement routier.

Au regard de l'expérience de l'INERIS, les valeurs classiques retenues pour les coefficients de foisonnement sont présentées dans le tableau 1.

Tableau 1 : exemples de valeurs de coefficient de foisonnement en fonction de la nature des terrains de recouvrement et de la présence d'eau.

Table 1 : Some bulking factor values according to the nature of the overburden and the presence of water

Nature des terrains	Foisonnement à sec	Foisonnement en présence d'eau
---------------------	--------------------	--------------------------------

Sables	1,1	1
Formations de sub-surface	$1,1 < f < 1,2$	$1 < f < 1,1$
Marnes	$1,2 < f < 1,3$	$1 < f < 1,1$
Craie / Roches tendres	$1,3 < f < 1,5$	$1,2 < f < 1,4$
Gneiss / Roches dures	$f > 1,4$	$f > 1,4$

Ces valeurs résultent d'un retour d'expérience de plusieurs années dans différents contextes miniers français et ne reflètent pas des caractéristiques intrinsèques de matériau. Là encore, elles gagneraient à être comparées à des valeurs issues d'autres approches ou celles collectées dans d'autres environnements et contextes.

La figure 16 confirme la forte influence de la valeur attribuée au coefficient de foisonnement des terrains sur les résultats du calcul de hauteur prévisible de remontée de fontis. Les simulations ont été établies pour la même configuration de cavités que celle prise pour la simulation précédente (ouverture de 2 mètres, largeur en pied de 4 mètres, rayon de remontée de cheminée de 1,5 m et angle de dépôt des éboulis de 35°).

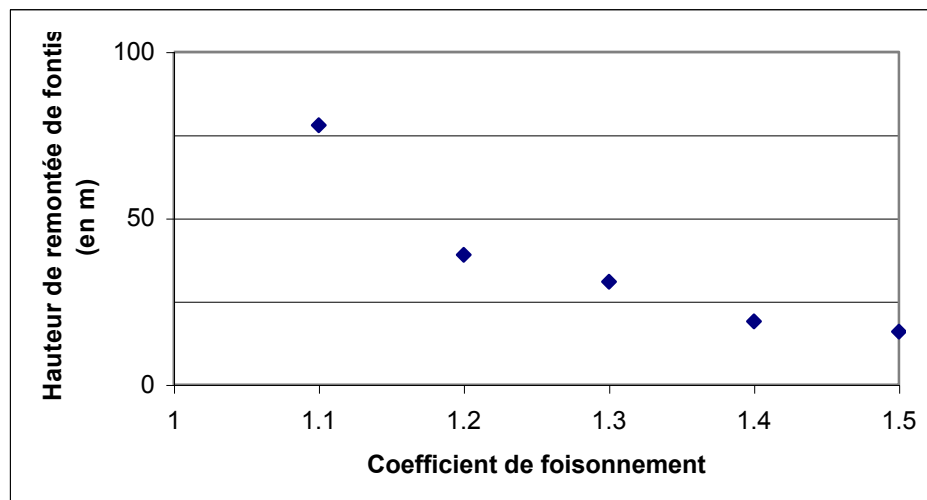


Figure 16 : Influence du coefficient de foisonnement sur la hauteur de remontée de fontis.

Figure 16 : Influence of bulking factor on collapse chimney height.

4.3 Angle de dépôt des terrains éboulés

On entend par angle de dépôt des éboulis, noté α , l'angle d'équilibre limite du talus constitué par les éboulis qui se répandent en galerie. La valeur de cet angle est généralement très proche de l'angle de frottement interne du matériau concerné, généralement noté ϕ ou ϕ' .

De manière générale, un angle d'équilibre limite dépend de la compacité du matériau, de la taille des blocs, de leur forme (éléments anguleux ou ronds) ainsi que l'état de surface des éboulis (rugueux ou lisse). Ainsi, plus les blocs seront anguleux et rugueux, plus le tas présentera un angle de dépôt élevé. Le dernier critère a trait à l'étalement de la granulométrie des éboulis, plus cet étalement est grand, plus l'angle de talus sera important.

La formulation suivante est proposée par Olivari, dans le cadre de la mécanique des sols :

$$\alpha = 36^\circ + \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4$$

Tableau 2 : Gammes de valeurs de α_1 , α_2 , α_3 , α_4 proposées par Olivari

Table 2 : Ranges of values for α_1 , α_2 , α_3 , α_4 as proposed by Olivari.

	Description des éléments éboulés	Valeur corrective de l'angle de dépôt
α_1 : compacité	Lâche	- 6°
	Moyenne	0°
	Dense	+ 6°
α_2 : forme et rugosité des éléments	Aigu	+ 1°
	Moyen	0°
	Arrondi	- 3°
	Très rond	- 5°
α_3 : grosseur des éléments	Sable	0°
	Gravier fin	+ 1°
	Gros gravier	+ 2°
α_4 : granulométrie	Uniforme	- 3°
	Moyenne	0
	Étalée	+ 3°

Comme pour le coefficient de foisonnement, le rôle de l'eau est également prépondérant sur la valeur de l'angle de dépôt. On différenciera à ce propos les matériaux sensibles à l'eau (argiles, marnes) des matériaux dont les propriétés mécaniques sont moins affectées par la présence d'eau (calcaire, granite...).

Pour les premiers, une simple présence d'eau (flaques, ruissellement, etc.) est de nature à altérer sensiblement les propriétés mécaniques des éboulis et diminuer parfois considérablement l'angle de dépôt. Pour les matériaux moins sensibles à l'eau, seule l'existence d'une galerie noyée au sein de laquelle viendrait se déposer les éboulis serait de nature à réduire sensiblement l'angle de dépôt de certains matériaux (marneux notamment).

Comme pour les coefficients de foisonnement, les valeurs de référence sont rares en littérature. L'évaluation devient d'ailleurs particulièrement délicate dès lors que plusieurs matériaux entrent en compte.

Au regard de l'expérience de l'INERIS, les valeurs classiques retenues pour les angles de dépôt sont présentées dans le tableau 3.

Tableau 3 : exemples de valeurs de d'angle de dépôt des éboulis en fonction de la nature des terrains de recouvrement et de la présence d'eau.

Table 3 : Some angle of repose of caved rock values according to the nature of the overburden and the presence of water

Nature des terrains	Angle de dépôt à sec	Angle de dépôt en présence
---------------------	----------------------	----------------------------

		d'eau
Sables et formations de sub-surface	30°	25°
Marnes	35°	10°
Craie / Roches tendres	45°	35°
Gneiss / Roches dures	50°	40°

Ici aussi, ces valeurs résultent d'un retour d'expérience et ne reflètent pas des caractéristiques intrinsèques de matériau et gagneraient à être confrontées avec d'autres retours d'expérience.

La figure 17 présente l'influence de l'angle de dépôt des éboulis sur la hauteur prévisible de remontée de fontis. Les simulations ont été établies pour la même configuration de cavités que celle prise pour les simulations précédentes (ouverture de 2 mètres, largeur en pied de 4 mètres, rayon de remontée de cheminée de 1,5 m et coefficient de foisonnement de 1,3).

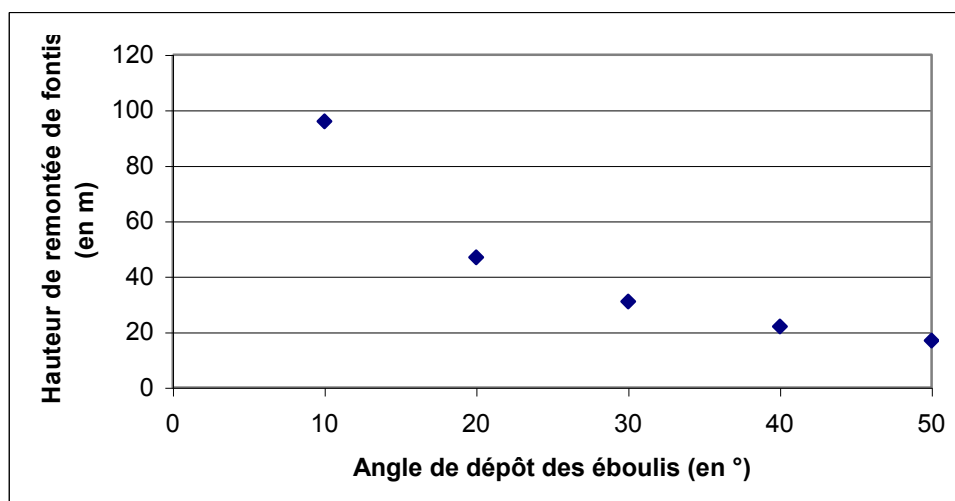


Figure 17 : Influence de l'angle de dépôt des éboulis sur la hauteur de remontée de fontis.

Figure 17 : Influence of the angle of repose of caved rock on collapse chimney height

5 Conclusions et perspectives

L'INERIS a développé et met en œuvre, depuis plusieurs années, un modèle analytique de prévision de hauteur de remontée de fontis. Ce modèle s'appuie sur une hypothèse de blocage du phénomène par auto-comblement résultant du foisonnement des terrains éboulés.

La démarche consiste en une modélisation volumétrique en trois dimensions du vide à combler au sein des ouvrages souterrains. Différentes formulations sont ainsi proposées en fonction du schéma d'exploitation mis en œuvre au sein des travaux souterrains (chambres et piliers abandonnés, différentes formes de galeries). Le modèle permet, à partir d'informations disponibles sur la géométrie des travaux et les propriétés des terrains constituant le recouvrement, de déterminer la hauteur prévisible de remontée de cheminée, permettant ainsi de statuer sur le risque d'apparition de fontis en surface.

L'analyse met clairement en évidence que plusieurs paramètres jouent un rôle critique sur cette hauteur prévisible de remontée de fontis. Il s'agit en particulier du rayon de la remontée de cheminée ainsi que du coefficient de foisonnement des terrains et de l'angle de dépôt des éboulis.

La mise en œuvre de cette démarche de prévention à de très nombreuses reprises et dans différents contextes a permis d'affiner progressivement l'approche, de l'élargir à différentes configurations d'exploitation et de la valider, par retour d'expérience, sur un grand nombre de cas réels étudiés. Quelques valeurs de référence prises, dans différents contextes géologiques, par les principaux paramètres physiques gouvernant le développement du phénomène de fontis sont proposées à titre d'information. Ils sont issus de l'expérience des ingénieurs de l'INERIS. La comparaison de ces valeurs avec le retour d'expérience d'autres équipes travaillant dans des contextes différents contribuera à alimenter la réflexion et à faire progresser la connaissance et la capacité d'expertise disponible dans le domaine de la prévision du risque de mouvements de terrain.

Une approche aussi fiable et précise que possible de ce type de phénomène s'avère, en effet, de toute première importance car les décisions prises par les donneurs d'ordre, sur les conseils des experts géotechniciens, peuvent se traduire par des mesures préventives très lourdes et coûteuses à mettre en œuvre (travaux de confortement, déplacement de population).

6 Références

- Abbass Fayad, A., Al Heib, M., Didier, C., Verdel, T., 2003. Numerical simulation of sinkhole formation using the UDEC computer code : influence of horizontal stress. Proceedings of the International Symposium on Geotechnical Measurements and Modelling GTMM 2003, 23-26 septembre 2003, Karlsruhe, Allemagne, pp. 255-260.
- Bruhn, R. W., Gray, R. E., 1982. Subsidence above Abandoned Coal Mines. Proceedings of Symposium of State-of-the-Art of Ground Control in Longwall Mining and Mining Subsidence, Honolulu, (1982).
- Darton, N.H., 1906. Geology of the Bighorn Mountains. U.S. Geological Survey Professional Paper 51, 129p.
- Delfaut, A., 2007. Méthode d'évaluation des hauteurs de montée d'un fontis en sol meuble. Bulletin de Liaison du Laboratoire des Ponts et Chaussées. Janvier/février/mars 2007.
- Didier C., Josien J.P., 2003. Importance of failure mechanisms for management of surface instability risk above abandoned mines. 10th Congress of the ISRM. 8-12 September 2003 Sandton Convention Centre, South Africa. Symposium Series S33 Volume 1 pp. 243-248.
- Dunrud, R.C., Osterwalk, F.W., 1980. Effects of Cola Mine Subsidence in the Sheridan, Wyoming, Area. USGS Professional Paper 1164.
- Dyne A., 1998. The Prediction and Occurrence of Chimney Subsidence in Southwestern Pennsylvania. Master of Science Thesis submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Garrard, G.F.G., Taylor, R.K., 1988. Collapse mechanisms of shallow coal-mine workings from field measurements. In Bell, F.G., Culshaw, M.G., Cripps, J.C., Lovell, M.A., 1988. Engineering Geology of Underground Movements, Geological Society. Special Publication, N°5, 181-192.
- Gray, R.E., Bruhn, R.W., Turka, R.J., 1977. Study and analysis of surface subsidence above the mine Pittsburg Coalbed. Report prepared for US Department of the Interior, Bureau of Mines, National technical Information Service, Springfield, Virginia, Report No. PB 281522.

- Hao, Q., 1991. Research on Subsidence Mechanisms in Abandoned Mine Room-and-Pillar Mines. National Mine Land Reclamation Center Midwestern Region – Southern Illinois University at Carbondale, Dept. Of Political Science, Carbondale, Illinois.
- Hoek, E., Brown, E.T., 1980. Underground Excavations in rock. Institution of Mining and Metallurgy, London, 1980.
- Karfakis, M.G., 1987. Mechanisms of chimney subsidence above abandoned coal mines, Proc. 6th intern. conf. Ground Control in Mining, Morgantown, West Virginia University, pp. 271-281.
- Laouafa, F., Tritesch, J.J., 2005. Stabilité des carrières : analyse critique de quelques méthodes analytiques. Actes du Séminaire de restitution et de valorisation des travaux INERIS – Réseau des LPC. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. Paris, France, 11 mai 2005.
- Mc Millan A.A., Boowne, M.A.E., 1987. The use and abuse of thematic information maps. In Culshaw, M.G, Bell, F.G., Cripps, J.C., O'Hara, M., 1987. Planning and Engineering Geology, Geological Society Special Publication, N° 4, 237-245.
- Morgan, T.A., 1973. Coal Mine Roof Problems in Ground Control Aspects of Coal Mine Design, Proc. Bureau of Mines technology Transfer Seminar, Lexington, Kentucky, United States, March 1973.
- NCB (National Coal Board), 1982. The treatment of disused mine shafts and adits. NCB library, 88p.
- Obert, L., Duvall, W.I., 1967. Rock Mechanics and the Design of Structures in Rock, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1967.
- Olivari, G. Cours de Mécanique des Sols ; Ecole Centrale de Lyon. France, 1975.
- Piggott, R.J., Eynon, P., 1978. Ground Movements arising from the Presence of Shallow Abandoned Mine Workings. Proc. Int. conf. On large ground movements and structures, University of Wales, pp.749-780.
- Poirot, N., Kecili-Laouafa, S., Laouafa, F., 2007. Comparaison de différentes approches numériques dans l'analyse des phénomènes d'instabilité de type fontis. Actes du 18^{ème} Congrès Français de Mécanique, 27-31 août 2007, Grenoble, France.
- Salmon, R. 1998. Validation d'une nouvelle méthode de mise en sécurité des anciennes carrières souterraines abandonnées : le remblayage partiel. Rapport de DEA. Ecole Centrale de Paris.
- Taylor, J.A., Fowell, R.J., 2007. Mining instability and the misuse of the 10-times-seam thickness rule. Proceedings of the 11th Congress of the International Society for Rock Mechanics, Lisbon, Portugal, 9-13 July 2007, pp. 63-68.
- Terzaghi, K., 1946. Introduction to tunnel technology. In : Proctor, R.V., White, T. Rock tunnelling with steel supports, Commercial Shearing and Stamping Co., Youngstown, Ohio.
- Timoshenko S., Woinowsky-Krieger S., 1940. Theory of Plates and Shells , McGraw-Hill Book Company, 1st Ed. 1940, 2nd Ed. 1959.
- Vachat, J.C., 1982. Les désordres survenant dans les carrières de la région parisienne. Mémoire diplôme d'ingénieur CNAM. Paris, 1982.

- Van der Merwe, J.N., Madden B.J., 2002. Rock Engineering for Underground Coal Mining. The South African Institut of Mining and Metallurgy. Special Publication Series 7. 233 p.
- Whittaker, B. N., Reddish, D. J., 1989. Subsidence: Occurrence, Prediction and Control, Elsevier Science Publishing Company Inc., New York.